

В.Н.БОРЩЕВ, докт.техн.наук,

В.А.АНТОНОВА, канд.техн.наук,

А.М.ЛИСТРАТЕНКО, канд.техн.наук, ГП НИТИП, Харьков;

С.М.ШКОЛЬНЫЙ, канд.техн.наук, НТУ «ХПИ», Харьков.

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАРКАСОВ ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В статті приведені результати, отримані при вирішенні проблеми проектування сотопластових каркасів сонячних батарей КА МС-2-8 з використанням вуглепластикових обшивок. Розв'язані задачі з отримання температурних полів та з отримання НДС для 3-D моделей таких каркасів.

In article the results received at the decision of a problem of designing honeycomb plastics of skeletons of solar batteries SA MS-2-8 with unsceing carbon fiber-reinforced plastic of coverings are given. Problems about reception of temperature fields and about reception of the IDC for 3-D models are solved

1. Введение и постановка задачи. Разработка солнечных батарей (СБ) для космических аппаратов (КА) непрерывно развивается в направлении увеличения коэффициента полезного действия, повышения надежности и снижения массы.

В результате поиска конструктивно-технологических решений по снижению массы каркасов СБ широкое применение получили трехслойные сотовые конструкции [1-4], которые состоят из двух тонких прочных облицовочных пластин – обшивок, толстой легкой сердцевины – сотового заполнителя, разделяющего несущие пластины и распределяющего нагрузку между ними, и адгезионных слоев, связывающих пластины с наполнителем и передающих нагрузку от заполнителя к облицовкам и обратно. Сотовый заполнитель работает на сдвиг и повышает изгибную жесткость системы.

Трехслойные конструкции обладают легкостью и жесткостью, хорошими звуко- и теплоизолирующими свойствами, высокой технологичностью, удовлетворительным качеством поверхности и формы, повышенной эксплуатационной надежностью вследствие отсутствия концентраторов напряжений, высокой вибростойкостью и стойкостью к атмосферным воздействиям.

Главными особенностями трехслойной конструкции является то, что она имеет момент инерции поперечного сечения значительно больший, чем однослойная той же массы, вследствие чего увеличивается поперечная жесткость и повышается критическое напряжение общей потери устойчивости [3]. При работе на поперечный изгиб трехслойная конструкция выгодна благодаря более высокому моменту сопротивления по сравнению с однослойной.

Основными функциями материалов для несущих пластин (обшивок) является обеспечение жесткости относительно изгиба и сдвига в плоскости пластин, а также передача нагрузок в той же плоскости [4]. В аэрокосмической

технике для обшивок используются композитные материалы, которые обеспечивают требования к таким важным характеристикам, как малая масса, высокие прочность и жесткость и хорошая стойкость к усталостным напряжениям.

Наиболее полно указанным требованиям удовлетворяют углепластиковые обшивки [2-4]. Углеродные волокна, входящие в состав углепластиков, кроме низкой плотности обладают высоким удельным модулем упругости и, следовательно, жесткостью в 7÷11 раз большей, чем у алюминия, титана и стали. Однако, несмотря на высокую жесткость графита, его работа на сжатие несколько ниже, чем работа на растяжение. Углепластики обладают по сравнению с стеклопластиковыми большей степенью черноты ϵ и более высокой теплопроводностью, что благоприятствует эффективному излучательному охлаждению СБ через поверхность.

Для углепластиков удельная прочность при растяжении ~0,92 ГПа (по сравнению с 0,2 ГПа для Al), модуль упругости – 84 ГПа, предел выносливости углеродных волокон составляет ~80 % от статической прочности по сравнению с 35 % у Al [4].

Следует отметить, что в аэрокосмической технике для углепластиков действуют температурные ограничения. В настоящее время имеются наибольшие достижения в области армирования волокнами, в то время как регулирование свойств матрицы все еще не достигло степени, при которой могли бы быть использованы все потенциальные возможности материала [4].

Несмотря на чрезвычайно низкие значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) у графитовых волокон ($(0,6 \div 1,0) \times 10^{-6}$ град⁻¹) [5,6], при изготовлении монослойных углепластиковых обшивок, в зависимости от технологии их изготовления и применяемых адгезивов, наблюдается значительное отличие ТКЛР в направлении основы (продольная ориентация волокон) и в направлении утка (поперечная ориентация волокон). В этом случае наличие даже небольшого температурного градиента по толщине каркаса может вызвать значительное его деформирование, что в свою очередь может стать возможной причиной разрушений токоведущих шин, коммутационных выводов и других конструктивных элементов СБ, изготовленных на таких каркасах, в условиях реального космического полета.

Для применения трехслойных сотовых конструкций с углепластиковыми обшивками и обеспечения их надежного и долговечного использования требуется проведение большого объема расчетных и экспериментальных исследований, включающих изучения механических свойств композитов и величин их разброса, разработку эффективных методов расчета, анализа и синтеза конструкций, исследование влияния температуры на механические свойства элементов каркаса, применяемых в условиях различного напряженно-деформационного состояния.

В качестве сотового каркаса для СБ КА МС-2-8 предложена трехслойная сотовая конструкция с двумя вариантами изготовления углепластиковых

вых обшивок. При первом варианте обшивки сотопластового каркаса изготавливались из монослоя углеродной ленты ЭЛУР – 0,08. При втором варианте обшивки изготавливались из двух монослоев углеродной ленты ЭЛУР – 0,08 со схемой укладки слоев 0° ; 90° , то есть с взаимно перпендикулярным расположением углеродных волокон в слоях. Углеродные ленты пропитывались эпоксидным связующим ЭДТ – 10П. В качестве изоляционного покрытия поверхности углепластика использована полиимидная пленка марки ПМ-А толщиной 40 мкм.

Сотовый наполнитель изготовлен из алюминиевой фольги толщиной 23 мкм с ячейкой 6 мм. Клеевое соединение обшивок с сотовым наполнителем осуществлялось с помощью эпоксидного клея марки ЭПО-ФЛЕКС-04. Торцы каркаса залиты пеноклесом марки АЭРОПЛАСТ-400М.

Цель данной работы – проведение теплового расчета и расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) различных вариантов конструкций каркасов СБ для космического аппарата МС-2-8 и обоснование выбора необходимых конструктивно-технологических решений изготовления облегченных трехслойных сотовых каркасов с углепластиковыми обшивками.

2. Основная модель. Расчет тепловых полей и полей НДС каркаса проводился в трехмерной постановке с применением системы конечноэлементного анализа ANSYS.

Расчетная модель для определения температурного поля каркаса создавалась с использованием многослойных оболочечных конечных элементов SHELL131 с одной степенью свободы (температура TEMP в отдельном узле КЭ) и с использованием объемных конечных элементов SOLID70 с аналогичной степенью свободы в отдельном узле. Расчетная модель для проведения структурного анализа каркаса и определения его НДС создавалась с применением многослойных оболочечных элементов SHELL181 с шестью степенями свободы в одном узле (линейные перемещения UX, UY, UZ и углы поворота ROTX, ROTY, ROTZ), а также с применением объемных конечных элементов SOLID45 с тремя степенями свободы (линейные перемещения) в одном узле.

Геометрия расчетной модели каркаса создана с применением электронных копий проекта СБ. Общий вид части использованной для расчетов модели показан на рис. 1 (верхняя обшивка при этом сделана невидимой).

Физико-механические свойства материалов, входящих в состав конструкции, приведены в табл.1. Свойства алюминиевого сплава АМг2, применяемого для изготовления сотового наполнения и конструктивных элементов СБ, задавались как для изотропного материала. Необходимо отметить, что в диапазоне температур $\pm 100^\circ\text{C}$ некоторые характеристики как углепластиков так и алюминиевых сплавов имеют существенную зависимость от температуры. Для полученных решений по задачам теплового анализа такие зависимости были учтены как линейные.

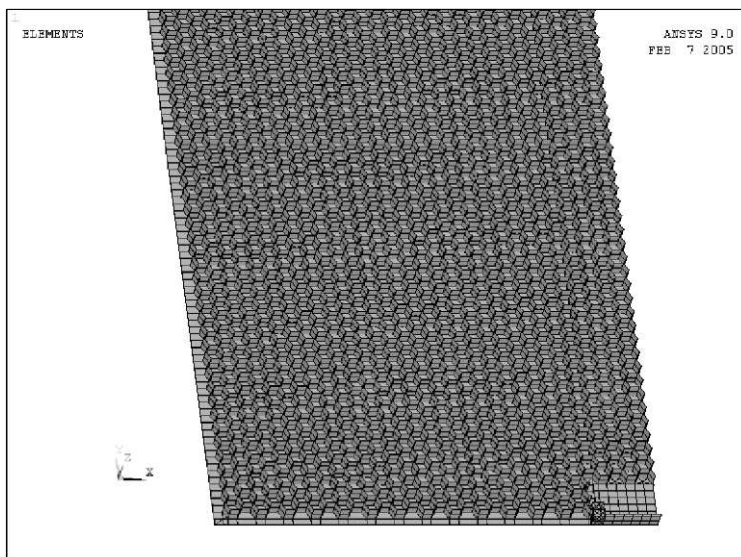


Рисунок 1 – Общий вид части конечноэлементной модели каркаса

Таблица 1 – Свойства материалов, входящих в состав конструкции каркаса СБ

Свойства материала	Материал	
	ЭЛУР-0,08	АМг2
1. Модуль упругости EX, кг/мм ²	7522,5	6800,0
2. Модуль упругости EY, кг/мм ²	100,0	–
3. Модуль упругости EZ, кг/мм ²	100,0	0,3
4. Коэффициент Пуассона NUXY	$0,1994 \times 10^{-2}$	–
5. Коэффициент Пуассона NUYZ	0,15	--
6. Коэффициент Пуассона NUXZ	$0,1994 \times 10^{-2}$	--
7. Модуль сдвига GXY, кг/мм ²	500,0	--
8. Модуль сдвига GYZ, кг/мм ²	500,0	--
9. Модуль сдвига GXZ, кг/мм ²	500,0	$0,268 \times 10^{-5}$
10. Плотность DENS, кг/мм ³	$0,15 \times 10^{-5}$	$0,242 \times 10^{-5}$
11. Температурный коэффициент линейного расширения ALPX, 1/°C	$0,5 \times 10^{-5}$	–
12. Температурный коэффициент линейного расширения ALPY, 1/°C	$0,14 \times 10^{-4}$	–
13. Температурный коэффициент линейного расширения ALPZ, 1/°C	$0,1 \times 10^{-4}$	0,175
14. Коэффициент теплопроводности KXX, Вт/(мм · К)	$0,43 \times 10^{-2}$	–

Продолжение табл. 1

15. Коэффициент теплопроводности KYY, Вт/(мм · К)	$0,1 \times 10^{-1}$	–
16. Коэффициент теплопроводности KZZ, Вт/(мм · К)	$0,1 \times 10^{-1}$	–

Тепловой анализ для расчетной модели каркаса СБ с заданными условиями по температуре для наружных обшивок проводился достаточно быстро (несколько секунд), а результат помещался в файл типа *.RTH в базе данных задачи.

Позже выяснилось, что использование полученных в тепловом анализе температурных полей каркаса СБ для определения его НДС, с учетом зависимости свойств материалов от температуры невозможно, поскольку как для половины модели, так и для его 1/4 части, имела место системная ошибка ANSYS, указывающая на недостаточность ресурсов используемой техники. Вместе с тем, для 1/7-й части модели такое решение было получено. Рассмотренные ограничения привели к необходимости непосредственного задания температурных полей для наружных обшивок каркаса и его срединной поверхности при проведении структурного анализа, вместе с граничными условиями задачи.

Решения тестовых задач для модели каркаса СБ (точнее, для его половины, при учете конструктивной симметрии) показали необходимую устойчивость и точность получаемых численных решений.

В качестве граничных условий по перемещениям для всех задач применено жесткое защемление в зоне крепления панели СБ к несущей раме спутника и условие, связанное с конструктивной симметрией каркаса СБ (равенство нулю перемещений по оси ОХ относительно плоскости симметрии).

3.Численный анализ тепловых полей и НДС каркаса. Для описанной выше конечноэлементной модели каркаса СБ были решены задачи термоупругого деформирования для нескольких значений температурного градиента по его толщине (перепад температур от 0°С до 200°С) в температурном диапазоне (-100... + 100)°С и для двух реализаций наружных обшивок каркаса СБ – с применением монослоя углеродной ленты ЭЛУР-0,08, и с применением двух слоев углеродной ленты ЭЛУР-0,08 с расположением основных несущих волокон каждого слоя под углом в 90 градусов друг к другу. И в том, и в другом случае учитывалась облицовка обшивки полиимидной пленкой толщиной 40мкм.

В обоих случаях средняя зона обшивок шириной 80мм укреплялась тройным слоем ленты ЭЛУР-0,08 с перекрестным армированием основных углеродных волокон по каждому слою.

Результаты расчетов параметров НДС двух моделей каркасов СБ при различных значениях температурного градиента по толщине приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов параметров НДС каркасов СБ

Выполнение обшивки каркаса СБ	Определяемые параметры НДС	Температурный градиент по толщине каркаса солнечной батареи, °С			
		0	60	100	200
1. Монослой	Максимальные перемещения:				
	UX, [мм]:	-0,19	-0,176	0,175	0,165
	UY, [мм]:	1,424	1,227	-1,225	0,772
	UZ, [мм]:	0,326	-13,486	-22,59	-45,04
	USUM, [мм]:	1,43	13,508	22,597	45,04
	Эквивалентные напряжения по Мизесу, SEQV, [кг/мм ²]:	14,41	12,06	11,758	12,226
2. Двойной слой	Максимальные перемещения:				
	UX, [мм]:	-0,208	-0,18	0,177	0,162
	UY, [мм]:	0,54	0,49	-0,47	0,42
	UZ, [мм]:	0,066	-8,94	-14,89	-29,74
	USUM, [мм]:	0,566	8,94	14,89	29,74
	Эквивалентные напряжения по Мизесу, SEQV, [кг/мм ²]:	18,65	14,13	11,085	7,82

Соответствующие поля суммарных перемещений каркасов для различных градиентов температур по толщине каркаса приведены на рис. 2-5.

4. Выводы. Анализ результатов, полученных для описанных выше вариантов температурного нагружения и конструктивных реализаций обшивок каркаса СБ, позволяет сделать следующие выводы:

- величина линейных перемещений каркаса СБ, связанная с его однородным температурным нагружением по наружным обшивкам и по срединной поверхности, определяется в основном градиентом температуры по толщине каркаса, увеличиваясь при его росте и наоборот;

- применение монослоев углепластика ЭЛУР-0,08 для наружных обшивок каркаса СБ не оправдано, поскольку наличие даже небольшого температурного градиента по толщине каркаса и различие свойств по основе и по утку отдельного монослоя вызывают значительное деформирование (перемещение по нормали при перепаде температур между обшивками в 60 °С составляет 13,5 мм, перепаде в 100 °С – 23 мм, 200 °С – 45 мм. При этом отсутствие градиента по толщине каркаса при его нагреве до 100°С вызывает перемещение в плоскости обшивки каркаса величиной до 1,5 мм), что при расстояниях между фотопреобразователями ~0,8

мм может приводить к разрушению коммутационных выводов;

– при аналогичных температурных режимах (нулевой градиент; нагрев до +100 °C) для каркаса с двухслойными обшивками (0 °C, 90 °C) перемещение по утку примерно в три раза меньше (см. табл. 2), что говорит о целесообразности использования именно обшивок на основе двухслойной углеродной ленты.

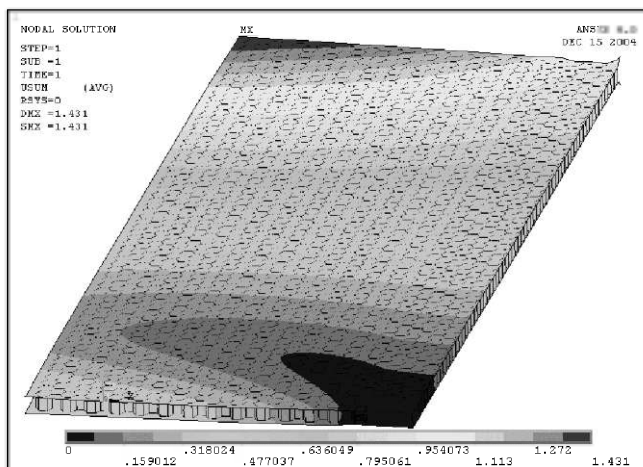


Рисунок 2 – Поле суммарных перемещений USUM для наружных обшивок каркаса изготовленных на основе монослоя углеродной ленты, при нулевом градиенте температур

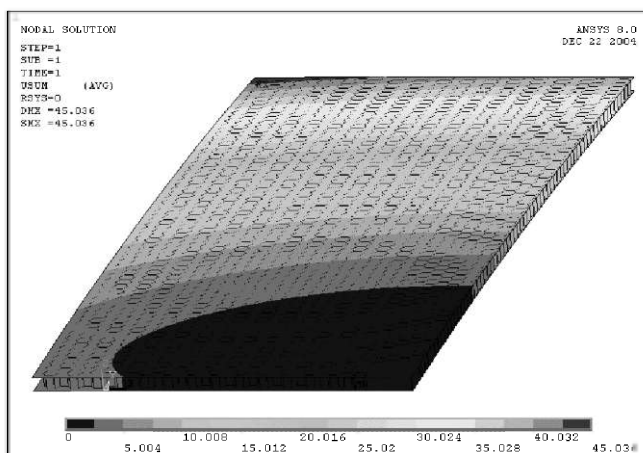


Рисунок 3 – Поле перемещений USUM для наружных обшивок, изготовленных на основе монослоя углеродной ленты, при перепаде температур между обшивками в 200 °C

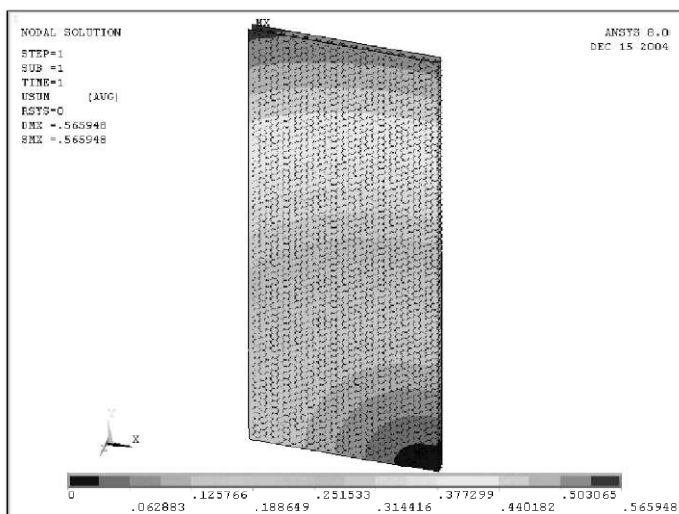


Рисунок 4 – Поле перемещений USUM для наружных обшивок, изготовленных на основе двойного слоя углеродной ленты, при нулевом градиенте температур

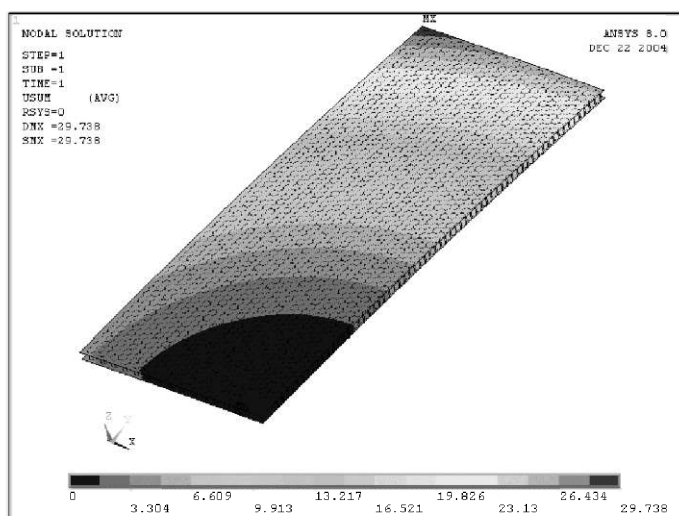


Рисунок 5 – Поле перемещений USUM для наружных обшивок, изготовленных на основе двойного слоя углеродной ленты, при перепаде температур в 200 °C

Необходимо подчеркнуть, что для полного теплового и структурного анализа СБ необходимо рассмотрение расчетных моделей, в которых учитывается влияние таких структурных элементов, как модули преобразователей

токосборных шин, коммутационные выводы и др. Такая работа в настоящее время проводится. Она имеет более сложный характер, требует большего времени, хотя и не содержит принципиальных трудностей.

Список литературы: 1. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Под ред. М.М. Катгула. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с. 2. Белан Н.В., Безручко К.В., Елисеев В.Б. и др. Бортовые энергосистемы космических аппаратов на основе солнечных и химических батарей. Ч.1. – Харьков: ХАИ, 1992. – 192 с. 3. Безручко К.В., Гайдуков В.Р., Губин С.В. и др. Солнечные батареи автоматических космических аппаратов (компоновка на КА, конструкции узлов, проекторочные расчеты). Харьков: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2001. 276 с. 4. Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн. Кн. 2. Пер. с англ. / Под ред. Б.Э. Галлера. – М.: Машиностроение, 1988. – 584 с. 5. Углеродные волокна / Под ред. С. Симакура. – М.: Мир, 1987. – 534 с. 6. Garter A.A., deOlivera R., Gandi A. Novel Thermal Management Structures and their application in new Hybrid Technologies and Feed Through Structure. Geneva 1999, CERN 99-08. P. 1-4.

Поступила в редколлегию 20.02.2005.

УДК 539.3:612.76

Ю.В.ВЕРЕТЕЛЬНИК, НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: МОДЕЛИ, ПОДХОДЫ, ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Ця стаття присвячена деяким механічним аспектам дослідження напружено-деформованого стану тіла хребця. Побудовані уточнені моделі тіла хребця, які можуть бути використані при подальших дослідженнях. Проведений якісний і кількісний аналіз впливу модуля пружності і коефіцієнтів анізотропії на поведінку хребця.

This article is devoted to some mechanical research aspects of vertebra body stressedly-deformed state. The specified models are built vertebra bodies, which can be used for further researches. The quality and quantitative influencing analysis of the elasticity modulus and anisotropy is conducted on the vertebra behaviour.

Актуальность

Биомеханические исследования костей и позвоночного столба в частности интенсивно ведутся последние 30 лет. Необходимость этих исследований вызвана целым рядом причин, таких как рост числа травм, попытками лечить такие повреждения, которые раньше были неоперабельными, а также достаточно большое число операций с послеоперационными осложнениями. Это стало возможно с появлением хорошо зарекомендовавших инструментов инженерных исследований, новых хирургических инструментов и роботов-манипуляторов. В совокупности они позволяют промоделировать и провести очень сложные операции.

Однако применять «в лобовую» инженерные методы исследования к биомеханическим системам практически невозможно, так как приходится учитывать ка-